

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
30. Januar 2003 (30.01.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 03/009058 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G02F 1/137**,  
1/03, C09K 19/52

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): **LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN** [DE/DE]; Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539  
München (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/DE02/02593**

(22) Internationales Anmeldedatum:  
15. Juli 2002 (15.07.2002)

(72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **FELDMANN, Jochen**  
[DE/DE]; Gartenstr. 29b, 85238 Petershausen (DE).  
**SÖNNICHSEN, Carsten** [DE/DE]; Zieblandstr. 6, 80798  
München (DE). **VON PLESSEN, Gero** [DE/DE]; Schüm-  
merstr. 9, 52134 Herzogenrath (DE). **PERNER, Martin**  
[DE/DE]; Josef-Sterr-Strasse 13, 81377 München (DE).  
**JAKAB, Arpad** [HU/DE]; Willi-Graf-Strasse 17/827,  
80805 München (DE).

(25) Einreichungssprache: **Deutsch**

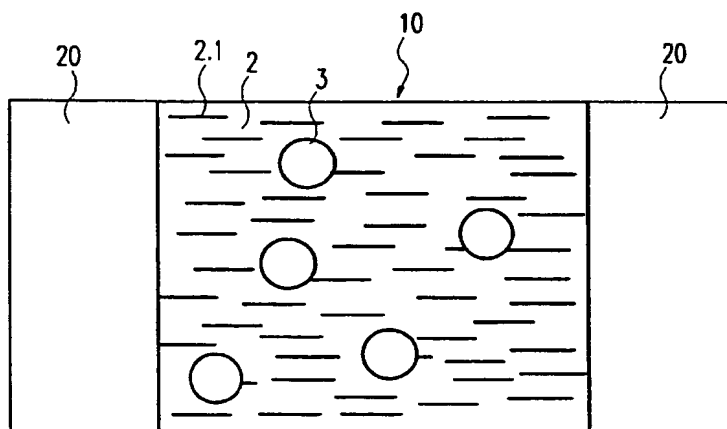
(26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch**

(30) Angaben zur Priorität:  
101 35 114.3 19. Juli 2001 (19.07.2001) **DE**

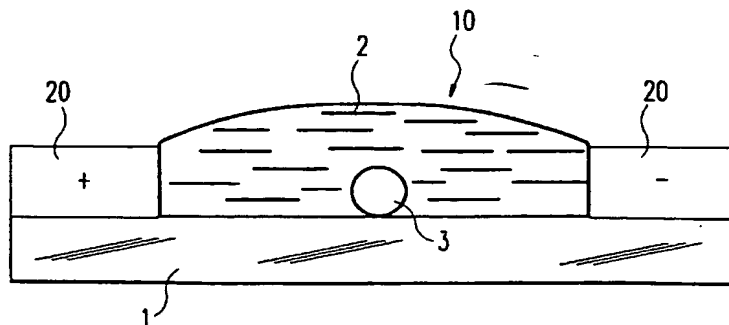
[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ELECTRICALLY CONTROLLABLE LIGHT MODULATOR HAVING A MATERIAL COMPOSITION BASED ON  
NANOPARTICLES THAT ARE EMBEDDED IN ELECTRO-OPTICAL MEDIA

(54) Bezeichnung: ELEKTRISCH STEUERBARER LICHTMODULATOR MIT EINER MATERIALZUSAMMENSETZUNG  
BASIEREND AUF IN ELEKTROOPTISCHEN MEDIEN EINGEBETTETEN NANOPARTIKELN



(57) Abstract: A layer (10) of a material composition comprises a medium (2), which is transparent to electromagnetic radiation in an area and inside of which a single or a number of particles (3) is/are embedded that are created so that their frequency-dependent response to the irradiation of electromagnetic radiation has at least one resonance, particularly a plasmon resonance, whereby the medium (2) has an anisotropy of the refractive index that can be induced or altered by an electric field. The electric field generated by two electrodes (20) permits the plasmon resonance to be shifted and thus the production of an electrically controllable light modulation, particularly light scatter or light reflection and light absorption.



WO 03/009058 A2

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



(74) **Anwalt:** LAMBSDORFF, Matthias; Dingolfinger  
Strasse 6, 81673 München (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten (national):** AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),

eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) **Zusammenfassung:** Eine Schicht (10) einer Materialzusammensetzung weist ein Medium (2) auf, welches in einem Bereich elektromagnetischer Strahlung transparent ist, und in welchem ein einzelnes oder eine Mehrzahl Partikel (3) eingebettet ist, welche derart beschaffen sind, dass ihre frequenzabhängige Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung mindestens eine Resonanz, insbesondere eine Plasmonenresonanz, aufweist, wobei das Medium (2) eine durch ein elektrisches Feld induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist. Durch das von zwei Elektroden (20) erzeugte elektrische Feld lässt sich die Plasmonenresonanz verschieben und damit eine elektrisch steuerbare Lichtmodulation, insbesondere Lichtstreuung bzw. -reflexion und Lichtabsorption herbeiführen.

## Beschreibung

Elektrisch steuerbarer Lichtmodulator mit einer Materialzusammensetzung basierend auf in elektrooptischen Medien eingebetteten Nanopartikeln

Die Erfindung bezieht sich im allgemeinen auf das Gebiet elektrisch steuerbarer Lichtmodulatoren. Insbesondere betrifft die Erfindung dabei eine Materialzusammensetzung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung, in welcher eine derartige Materialzusammensetzung enthalten und ein diese Materialzusammensetzung durchsetzendes elektrisches Feld erzeugbar ist. Eine derartige Vorrichtung kann als ein elektrisch steuerbarer Lichtmodulator, insbesondere in der Form eines Lichtstreuers oder Lichtabsorbers, eingesetzt werden und beispielsweise bei Lichtwellenleitern oder Bildschirmen zur Anwendung kommen.

In vielen technologischen Bereichen spielt Licht eine immer wichtigere Rolle. Insbesondere auf den Gebieten der Beleuchtung, der Übertragung von Daten (Telekommunikation, Internet, etc.) und der Sichtbarmachung von Informationen mittels Bildschirmen (Monitore, Anzeigevorrichtungen für Mobiltelefone und andere elektronische Geräte) sowie der Diagnostik und Sensorik (insbesondere für Anwendungen in der Biotechnologie) kommt optischen Technologien eine ständig steigende Bedeutung zu. In allen genannten Bereichen kommt es entscheidend darauf an, die Eigenschaften des Lichts wie Intensität, Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung kontrollieren zu können. Bei der Beleuchtung möchte man z.B. Farbeindruck, Helligkeit und Streueigenschaften von Oberflächen und transparenten Materialien manipulieren, während man bei der optischen Kommunikation verschiedenen Wellenlängen des Lichts Informationen aufprägt und diese mittels Glasfasern über z.T. riesige Entfernungen transportiert und dann dekodiert. Bei farbigen Displays kommt es entscheidend darauf an, jedes aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau bestehendes Pixelele-

ment eines Pixelfeldes dazu zu bewegen, jede Farbe mit einstellbarer Intensität in möglichst alle Richtungen abzustrahlen.

- 5 Die Kontrolle all dieser Lichteigenschaften in den verschiedenen Anwendungsbereichen erfolgt in der Regel auf elektrischem Wege. Bauelemente, die über Anlegen einer Spannung oder Zuführung von Strom Lichteigenschaften ändern bzw. Licht erzeugen können, werden allgemein als optoelektronische oder
- 10 elektrooptische Bauelemente bezeichnet. Diese werden in den meisten Fällen aus anorganischen Halbleitermaterialien und seit einigen Jahren zunehmend auch aus organischen Materialien hergestellt.
- 15 Die meisten optoelektronischen Bauelemente beruhen auf Änderungen der Lichtabsorption (Elektroabsorption) oder des Brechungsindex (elektrorefraktive bzw. elektrooptische Effekte). Ein bekanntes und bereits kommerziell erhältliches Beispiel ist das der „schaltbaren Fenster“ („switchable windows“).
- 20 Durch Anlegen einer elektrischen Spannung können Fensterscheiben von dem normalen diffusen Streuzustand in einen transparenten Zustand geschaltet werden. Hierzu werden z.B. Tropfen aus Flüssigkristallen in einer Polymermatrix zwischen zwei leitenden Glasplatten durch ein elektrisches Feld ausgerichtet, wie es beispielsweise in der US-A-6,215,535 beschrieben ist.

- Alternativ können auch Polymerpartikel verwendet werden, die in einem Flüssigkristall dispergiert sind; der diffuse Streuzustand wird dann durch eine Domänenbildung im Flüssigkristall verursacht, welche durch die Polymerpartikel ausgelöst wird; der transparente Zustand wird durch Ausrichtung des
- 30 Flüssigkristalls im elektrischen Feld erreicht. Im Hinblick auf den kommerziellen Einsatz konkurrieren solche elektrisch steuerbaren Lichtstreuern beispielsweise mit elektrochromen Materialien, bei denen sich als Folge einer elektrisch
- 35 schaltbaren chemischen Reaktion die Farbe des Materials ändert.

5 dern lässt. Die Möglichkeit der Einbettung von Partikeln in Flüssigkristallen hat auch zu grundlagenorientierten theoretischen Untersuchungen der Lichtstreuungseigenschaften von Partikeln geführt, die in optisch anisotropen Medien eingebettet sind.

10 Aus der US-A-5,645,758 ist beispielsweise eine Materialzusammensetzung und ein aus dieser aufgebauter Lichtmodulator bekannt, bei welchen in ein flüssigkristallines Material Partikel eingebettet sind, die zu den flüssigkristallinen Molekülen eine chemische Affinität aufweisen und deren Ausdehnung zwischen 0,1 und 20  $\mu\text{m}$  und deren Aspektverhältnis (Länge zu Breite) größer als 2 ist. Dabei sind die Partikel in der Materialzusammensetzung in einer Menge vorhanden, durch die es 15 erwünschtermaßen zur Ausbildung einer Vielfach-Domänenstruktur mit zufälliger Verteilung der Ausrichtung der flüssigkristallinen Moleküle kommt. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes können die flüssigkristallinen Moleküle und mit ihnen die Partikel entlang der elektrischen Feldlinien ausgerichtet 20 werden und damit ein für Licht bestimmter Wellenlänge transparenter Zustand herbeigeführt werden. Bei Abschalten des elektrischen Feldes wird dieser Zustand zunächst beibehalten („gespeichert“) und kann lediglich durch Beaufschlagung mit einer Temperatur, bei der der Flüssigkristall einen isotropen 25 Zustand einnimmt, wieder in den Ausgangszustand zurückversetzt werden.

30 In der gattungsbildenden US-A-5,023,139 werden die Eigenschaften von Partikeln, insbesondere Partikeln mit nanoskopischen Ausmaßen (in der Druckschrift genannter mittlerer Durchmesser  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  m) beschrieben, die einen Kern und mindestens eine Schale aufweisen, wobei mindestens der Kern oder eine der Schalen durch ein Metall gebildet sind und mindestens der Kern oder eine der Schalen aus einem dielektrischen Material gebildet sind, welches ein nichtlineares Antwortverhalten dritter Ordnung ( $\chi^{(3)}$ -Beitrag der nichtlinearen Polarisierung) aufweist. In einer Ausführungsform bestehen die 35

Partikel lediglich aus Metall und sind in ein umgebendes dielektrisches Material („Schale“) eingebettet. Das Metall der Partikel weist eine Plasmonenresonanz auf, deren Stärke und relative Lage auf der Frequenzskala in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie dem Verhältnis zwischen dem Kernradius  
5 und dem Radius der ersten inneren Schale dargestellt werden.

Hinsichtlich potentieller Anwendungen der im Stand der Technik realisierten oder vorgeschlagenen elektrisch steuerbaren  
10 Lichtmodulatoren bestehen jedoch noch die folgenden Probleme:

1. Lichtsignale in Wellenleitern können in ihrer Intensität von außen nicht einfach kontrolliert werden.
2. Flache, großflächige, leichte, biegsame und farbige Bildschirme lassen sich bisher nicht zu vertretbaren Preisen herstellen.  
15
3. Die integrierte Optik und Mikrooptik verlangt nach neuen Bauelementen, die es erlauben, Lichtsignale aus Wellenleitern der unterschiedlichsten Geometrie räumlich und spektral selektiv auskoppeln zu können. Hierzu sind Bauelemente nötig,  
20 die sich jeder Geometrie anpassen lassen (keine herkömmlichen anorganischen Kristalle).
4. Für Zwecke der Raumbelichtung werden elektrisch schaltbare Fenster und Streuscheiben benötigt, die neben der Licht-  
25 helligkeit auch den Farbeindruck regeln lassen.
5. Räumliche Lichtmodulatoren unterscheiden in der Regel nicht gezielt zwischen verschiedenen Lichtwellenlängen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Materialzusammensetzung und eine daraus herstellbare Vorrichtung wie einen elektrisch steuerbaren Lichtmodulator anzugeben, mit denen es möglich ist, die Streuung und die Absorption von Licht einer bestimmten Wellenlänge oder eines bestimmten Wellenlängenbereichs elektrisch zu steuern bzw. ein- und auszuschalten. Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, geeignete Bauelemente anzugeben, mit welchen die oben angesprochenen  
35 Probleme gelöst werden können.

Die erstgenannte Aufgabe wird durch eine Materialzusammensetzung nach den kennzeichnenden Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Die weitere Aufgabe wird durch die darauf rückbezogenen abhängigen Ansprüche gelöst. Weitere vorteilhafte Weiterbildungen und Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Ein wesentlicher Gedanke der Erfindung liegt darin, in einer Materialzusammensetzung mindestens ein Partikel, welches eine Resonanz aufweist, die vorzugsweise im lichtoptischen Spektralbereich oder in seiner Nähe liegt und weiterhin vorzugsweise durch eine Plasmonenresonanz gebildet ist, in ein Medium einzubetten, welches eine durch den Einfluß von elektrischen und/oder optischen Feldern induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist.

Eine derartige Materialzusammensetzung wird erfindungsgemäß dazu verwendet, die Intensität eines elektromagnetischen Strahlungsbündel zu modulieren, indem dieses durch die Materialzusammensetzung geführt wird und in der Materialzusammensetzung elektrische und/oder optische Felder erzeugt werden.

Im einfachsten Fall kann vorgesehen sein, dass die Materialzusammensetzung von einem homogenen elektrischen Feld durchsetzt wird. Ein solches homogenes elektrisches Feld kann beispielsweise durch eine geeignete Anordnung von Elektroden erzeugt werden, zwischen denen die Materialzusammensetzung angeordnet ist.

Das (Einbettungs-)Medium soll also derart beschaffen sein, daß durch ein das Medium durchdringendes elektrisches Feld eine ohne elektrisches Feld nicht vorhandene optische Doppelbrechung induziert oder eine ohne elektrisches Feld bereits vorhandene Doppelbrechung in ihrer Stärke und/oder Ausrichtung verändert wird. Durch das Anlegen des elektrischen Feldes verändert sich aufgrund der Änderung und Aufspaltung der

- Dielektrizitätskonstanten in eine parallel und eine senkrecht zur optischen Achse polarisierte Komponente die plasmonische Resonanz der Partikel auf der Frequenz- oder Wellenlängenachse, wodurch eine eingestrahlte elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge, bei der das Medium im wesentlichen transparent ist, je nach der eingetretenen Veränderung entweder stärker oder weniger stark von den Partikeln gestreut und absorbiert wird.
- 10 Die Änderung der Plasmonenresonanz ist in der Regel im wesentlichen gleichbedeutend mit ihrer Verschiebung auf der Frequenz- oder Wellenlängenachse, z.B. mit einer entsprechenden Verschiebung ihres spektralen Maximums. Es kann aber auch zusätzlich zu der Verschiebung eine Veränderung der Kurvenform der Plasmonenresonanzkurve hinzukommen. Theoretisch denkbar ist auch eine bloße Veränderung der Kurvenform, beispielsweise eine Änderung der Breite der Resonanzkurve, ohne dass sich die Resonanzkurve oder deren Maximum auf der Frequenz- oder Wellenlängenachse verschiebt. Allgemein kann somit gesagt werden, dass in jedem Fall die spektrale Signatur der Plasmonenresonanzkurve durch den Einfluss der Felder verändert wird.
- Bei geeigneter Wahl der Materialien und der übrigen Anordnung kann erreicht werden, dass die Veränderung der Plasmonenresonanz im wesentlichen ohne zeitliche Verzögerung der Veränderung des durchdringenden elektrischen Feldes folgt. Somit können auch elektrische Wechselfelder an die Materials substanz angelegt werden und die Frequenz und Phase des angelegten elektrischen Wechselfeldes entspricht der Frequenz und Phase der durch das elektrische Wechselfeld hervorgerufenen Änderungen der Plasmonenresonanz und somit auch der Frequenz und Phase der Lichtintensitätsänderungen des modulierten Lichtstrahls. Es ist auch denkbar, dass die Frequenz des angelegten elektrischen Wechselfeldes so hoch ist, dass man von einem optischen Wechselfeld sprechen kann, wobei auch bei derart hohen Frequenzen die Veränderung der Plasmonenresonanz



vorteilhafter oder wünschenswerter Weise dem sich ändernden Wechselfeld folgt. Dies bedeutet, dass die zu modulierende elektromagnetische Strahlung durch die elektromagnetische Welle des Wechselfeldes moduliert wird. Die erfindungsgemäße  
5 Verwendung der Materials substanz in einem Lichtmodulator setzt somit auch nicht notwendigerweise die Verwendung von Elektroden zum Anlegen des elektrischen Wechselfeldes voraus.

Wenn daher im Folgenden von einem optischen Feld die Rede  
10 ist, so ist damit ein elektromagnetisches Wechselfeld entsprechend hoher Frequenz gemeint, während ein elektrisches Feld sowohl ein statisches Feld als auch ein dynamisches Wechselfeld jeder beliebigen Frequenz bezeichnet.

15 Es kann auch vorgesehen sein, dass mehrere elektrische und/oder optische Felder gleicher oder verschiedener Schwingungsfrequenz an die Materialzusammensetzung angelegt werden. Beispielsweise kann ein zeitlich konstantes elektrisches Feld zwischen dafür vorgesehene Elektroden angelegt werden, um et-  
20 wa die Plasmonenresonanz auf eine bestimmte Position auf der Frequenzachse zu ziehen und somit einen "Arbeitspunkt" festzulegen. Dieses statische Feld kann dann von einem elektrischen Wechselfeld überlagert werden, mit dem die eigentliche Lichtmodulation bewirkt wird. Dieses Feld kann entweder eben-  
25 falls durch die genannten oder andere Elektroden eingekoppelt werden oder es kann ohne Verwendung von Elektroden als freie elektromagnetische Welle von außen eingekoppelt werden.

Die Materialzusammensetzung kann eine Mehrzahl von Partikeln  
30 aufweisen, die in das Medium eingebettet sind. Es ist jedoch auch denkbar, dass lediglich ein einzelnes Partikel der beschriebenen Art in dem Medium eingebettet ist.

Für das Medium kommen verschiedene Materialien in Frage. Bei-  
35 spielsweise bieten organische Materialien prinzipiell den Vorteil, mit einfachen Methoden und daher kostengünstig großflächige und prinzipiell auch mechanisch biegsame Bauelemente

herstellen zu können. Als besonders geeignete Medien können Flüssigkristalle angesehen werden, da sich in bisher unveröffentlichten Experimenten der Erfinder gezeigt hat, dass sich die plasmonische Streuresonanz von beispielsweise Silber-Nanopartikeln drastisch in der Wellenlänge verschieben lässt, wenn man sie in einen Flüssigkristall einbettet und an diesen ein elektrisches Feld anlegt. Durch das angelegte elektrische Feld werden die flüssigkristallinen Moleküle ausgerichtet, wodurch ein stark anisotroper Brechungsindex und somit eine polarisationsabhängige spektrale Verschiebung der Plasmonenresonanz hervorgerufen wird.

Unter derzeitigen wirtschaftlichen Gesichtspunkten können Flüssigkristalle auch als die wichtigste organische Materialklasse angesehen werden, da sich mit ihnen durch Ausnutzung ihrer polarisierenden Eigenschaften Flachbildschirme und Lichtmodulatoren herstellen lassen. Darüber hinaus werden zur Zeit mittels Flüssigkristall-Bragg-Gittern Bauelemente entwickelt, die die Wellenlänge und die Abschwächung von Lichtsignalen in Wellenleitern regeln können. Diese Bauelemente sollen zur Signalnivellierung von Wavelength Division Multiplexing (WDM)-Signalen eingesetzt werden.

Anstelle von Flüssigkristallen kann das Medium jedoch auch beliebig andersgeartete durch das elektrische Feld ausrichtbare Moleküle aufweisen.

Als Medien kommen desweiteren auch anorganische elektrooptische Materialien, insbesondere ferroelektrische Kristalle wie z.B.  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  und KDP in Frage.

Die in das elektrooptische Material eingebetteten Partikel sollen in ihrer frequenzabhängigen Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung - insbesondere im lichtoptischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums eine Resonanz, vorzugsweise eine Plasmonenresonanz, aufweisen. Die Partikel enthalten demzufolge beispielsweise entweder ein Me-

tall, einen stark dotierten Halbleiter oder einen Supraleiter, wobei auch vorstellbar ist, dass die Partikel einen Aufbau besitzen, in dem eine Kombination aus diesen Materialien verwendet wird. In einer bevorzugten Ausführungsform sind die  
5 Partikel zur Gänze aus einem Metall, insbesondere aus Gold, Silber, Kupfer oder aus Alkalimetallen zusammengesetzt.

Die Partikel sind ferner vorzugsweise als sogenannte Nanopartikel ausgebildet, womit hier ein Bereich eines mittleren  
10 Partikeldurchmessers von 1-1000 nm, insbesondere 1-500 nm, insbesondere 1-200 nm, insbesondere 1-100 nm gemeint sein soll. Durch Nanopartikel dieser Größe, die beispielsweise aus Silber oder Gold hergestellt werden, können Plasmonenresonanzen bereitgestellt werden, die beispielsweise im ultravioletten, sichtbaren oder infraroten Spektralbereich liegen und  
15 daher für Anwendungszwecke besonders von Interesse sind.

Die eingesetzten Partikel weisen bevorzugtermaßen eine sphärische, ellipsoidale oder stäbchenförmige Form auf.  
20

In einer einfachen Vorrichtung, in der ein die Materialzusammensetzung durchsetzendes elektrisches Feld bereitgestellt wird, können beispielsweise zwei voneinander beabstandete Elektroden angeordnet und in deren Zwischenraum die Material-  
25 zusammensetzung eingefüllt werden. Auf einem gemeinsamen für die zu modulierende Wellenlänge transparenten Substrat können sowohl die Materialzusammensetzung als auch lateral davon die beiden Elektroden abgeschieden werden. Die Elektroden werden an eine Spannungsquelle angeschlossen.

30 Die Elektroden können auch auf die als Schicht abgeschiedene Materialzusammensetzung aufgebracht werden, ohne mit dem Substrat in Kontakt zu stehen, wobei das sich zwischen den Elektroden ausbildende elektrische Feld die Materialzusammensetzung nur zum Teil durchdringt.  
35

Diese einfache Vorrichtung kann allgemein als Lichtmodulator verwendet werden, in dem die Absorption, Streuung oder Reflexion einer elektromagnetischen Welle in Abhängigkeit von dem angelegten elektrischen Feld in einer gewünschten Weise moduliert werden kann. Die Lichtmodulation beruht darauf, dass sich bei einer Änderung des angelegten elektrischen Feldes die Plasmonenresonanz in bezug zu der relativen Lage der Wellenlänge der eingestrahlten elektromagnetischen Welle verändert und somit durch die elektromagnetische Welle die plasmonische Schwingung in den Partikeln stärker oder schwächer angeregt wird. Damit wird die elektromagnetische Welle entsprechend stärker oder schwächer von den Partikeln absorbiert. Da durch die angeregte plasmonische Schwingung wiederum eine elektromagnetische Welle emittiert wird, wird die ursprüngliche elektromagnetische Welle entsprechend stärker oder schwächer von den Partikel gestreut bzw. reflektiert.

Eine derartige Vorrichtung kann beispielsweise als elektrisch steuerbarer Lichtmodulator in einen Wellenleiter eingesetzt werden, um darin das Licht einer in dem Wellenleiter geführten elektromagnetischen Welle gezielt herauszustreuen. In diesem Fall wirkt der Lichtmodulator als ein Lichtstreuer.

Es kann ferner ein monochromer oder vollfarbtauglicher Bildschirm hergestellt werden, indem eine Matrix von Pixelelementen, die jeweils durch einen oder mehrere erfindungsgemäße elektrisch steuerbare Lichtstreuer aufgebaut sind, auf einem optisch transparenten Substrat aufgebracht werden. Die Pixelelemente können in an sich bekannter Weise separat voneinander angesteuert und mit elektrischen Spannungen beaufschlagt werden. Von den Seitenkanten oder von der Unterseite in das Substrat eingekoppeltes Licht wird dann für jedes Pixel je nach der vorhandenen Spannung aus der Ebene des Substrats herausgestreut und addiert sich bei Betrachtung von einer bestimmten Entfernung zu einem gewünschten Gesamtbild. Bei einem monochromen Bildschirm wird Licht einer bestimmten Farbe in das Substrat eingekoppelt. Bei einem vollfarbtauglichen

Bildschirm besteht dagegen jedes Pixelelement aus drei Subpixeln für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. In das Substrat werden diese drei Farben, die beispielsweise von LEDs oder Laserdioden emittiert werden, eingekoppelt und die  
5 drei Subpixel sind derart als erfindungsgemäße elektrisch steuerbare Lichtstreuer konzipiert, dass sie von den eingekoppelten drei Grundfarben je nach angelegter Spannung entweder das rote, das grüne oder das blaue Licht aus der Substratebene herausstreuen.

10

Eine weitere Anwendung besteht in einer Substratscheibe, beispielsweise Glas- oder Kunststoffscheibe, in der eine erfindungsgemäße Vorrichtung als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer integriert ist, und in der ein elektrisch steuerbarer Farbeffekt hervorgerufen werden kann. Zu diesem Zweck  
15 kann beispielsweise auf einer Hauptoberfläche einer transparenten oder semitransparenten Substratscheibe eine Schicht der Materialzusammensetzung aufgebracht werden und zu beiden Seiten eines gewünschten Schichtabschnitts können die Elektroden auf das Substrat oder lediglich auf die Schicht aufgebracht werden. Abhängig von der angelegten Spannung erscheint  
20 das transmittierte Licht aufgrund der Verschiebung der Plasmonenresonanz dem Betrachter in zwei verschiedenen Farben. Es kann dabei vorgesehen sein, dass sich die Plasmonenresonanz bei Anlegen des elektrischen Feldes innerhalb des sichtbaren Spektrums verschiebt oder dass sie sich aus einem Bereich außerhalb des sichtbaren Spektrums in den sichtbaren Bereich  
25 hinein oder umgekehrt verschiebt.

30 Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert, in denen Ausführungsbeispiele dargestellt sind. Es zeigen:

Fig.1a,b eine Draufsicht und eine Seitenansicht einer  
35 erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig.2a,b Lichtstreuenspektren von Silber-Nanopartikeln;

Fig.3                    Abhängigkeit des energetischen Plasmonenresonanzniveaus von dem Polarisationswinkel der elektromagnetischen Strahlung;

5

Fig.4                    ein Wellenleiter mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig.5                    ein polychromer Bildschirm mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

10

Fig.6                    eine partielle Querschnittsansicht einer weiteren Ausführungsform eines Bildschirms mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

15

Fig.7                    eine (Fenster-)Glasscheibe mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

In der Fig.1 ist zunächst eine einfache Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung in einer Draufsicht (a) und einer Seitenansicht (b) abgebildet, die als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer eingesetzt werden kann.

20

Die Vorrichtung ist auf einem als Substrat 1 dienenden Mikroskop-Deckglas aufgebracht und weist eine Schicht 10 eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Materialzusammensetzung und zwei Elektroden 20 auf, die ebenfalls auf dem Substrat 1 abgeschieden sind und zwischen denen die Materialzusammensetzung angeordnet ist. Vorzugsweise stehen die Elektroden an den Seiten der Materialzusammensetzungsschicht 10 mit dieser in Kontakt. Dies ist jedoch nicht zwingend. Da die Schicht 10 lediglich von einem zwischen den Elektroden 20 erzeugten elektrischen Feld durchsetzt werden soll, jedoch kein elektrischer Strom fließen soll, ist theoretisch auch denkbar, zwischen den Elektroden 20 und der Schicht 10 einen Abstand zu lassen, etwa falls die Materialzusammensetzung nicht mit dem Elektrodenmaterial verträglich ist.

30

35

Bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel basiert die Materialzusammensetzung auf dem als Medium 2 dienenden nematischen Flüssigkristall mit der Bezeichnung E7 (Hersteller  
5 Merck), der in Fig.1 durch Flüssigkristallmoleküle 2.1 angedeutet ist. In den Flüssigkristall 2 sind im wesentlichen sphärisch geformte nanoskopische Silberpartikel 3 eingebettet, von denen symbolhaft eine geringe Anzahl in der Fig.1 dargestellt ist.

10

Die Materialzusammensetzung wird dadurch hergestellt, indem zunächst in Wasser dispergierte kommerziell erhältliche Silberpartikel 3 mit einem mittleren Durchmesser von 60 nm durch Schleuderguß auf dem Mikroskop-Deckglas 1 aufgebracht werden.  
15 Nach einer Trocknung wird dann eine flüssigkristalline Schicht des Flüssigkristalls 2 (E7) durch Schleuderguß auf die Probe aufgebracht. Vorher wurden Elektroden 20 aus Gold mit einer Dicke von 100 nm auf das Substrat 1 mit einem Abstand von 200  $\mu\text{m}$  aufgedampft, so dass sich zwischen  
20 ihnen die Materialzusammensetzung befindet. Es werden elektrische Felder von typischerweise  $F = 2 \times 10^4 \text{ V/cm}$  zwischen den Elektroden 20 angelegt, um die Flüssigkristallmoleküle 2.1 im wesentlichen vollständig zu den elektrischen Feldlinien auszurichten.

25

Damit eine erfindungsgemäße Vorrichtung wie die in Fig.1 gezeigte als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer wirken kann, ist es notwendig, dass das Medium 2 im wesentlichen für eine zu modulierende elektromagnetische Strahlung transparent ist.  
30 Das Licht tritt dann durch das ebenfalls für diese Wellenlänge im wesentlichen transparente Substrat 1 und das Medium 2 hindurch. Durch das elektrische Feld wird infolge der Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle 3 eine Anisotropie im Brechungsindex oder der Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  in dem Medium 2  
35 erzeugt. Diese bewirkt eine polarisationsabhängige Verschiebung der Plasmonenresonanz der Partikel 3. Je nach der relativen Lage der eingestrahlten Lichtwellenlänge zu der Plasmone-

nenresonanz kann also entweder die Plasmonenresonanz durch Anlegen des elektrischen Feldes in die eingestrahlte Lichtwellenlänge oder aus dieser heraus geschoben werden. Im ersten Fall wird die Vorrichtung, die zuvor für die Lichtwellenlänge im wesentlichen vollständig transparent war, anschließend für diese Lichtwellenlänge fast undurchlässig, da das Licht an den Partikeln 3 absorbiert und gestreut wird. Im zweiten Fall schaltet die Vorrichtung von einem zuvor im wesentlichen undurchlässigen Zustand durch das Anlegen des elektrischen Feldes in einen für das Licht durchlässigen Zustand, da das Licht nicht mehr durch die Plasmonenresonanz der Partikel 3 absorbiert und gestreut wird.

Alternativ zu der in Fig.1a,b gezeigten Ausführungsform können die Elektroden auch als transparente Elektroden, wie beispielsweise ITO- (Indiumzinnoxid-)Schichten ausgeführt und auf den Lichtein- und -austrittsflächen der Schicht 2 abgeschieden sein.

In Fig.1a,b ist ein Zustand dargestellt, in dem die Flüssigkristallmoleküle 2.1 durch das elektrische Feld ausgerichtet sind. Wenn kein elektrisches Feld vorhanden ist, ist die Flüssigkristallschicht 10 in Domänen mit einem typischen Durchmesser von ca. 5  $\mu\text{m}$  aufgeteilt, in denen die Moleküle 2.1 jeweils spontan in eine Richtung ausgerichtet sind.

In den Figuren 2a,b sind jeweils Streuspektren von Silber-Nanopartikeln zweier verschiedener Domänen vor und nach Anlegen des elektrischen Feldes dargestellt. Alle Streuspektren zeigen die Plasmonenresonanz als ein deutlich ausgeprägtes Maximum der gestreuten Lichtintensität in Abhängigkeit von der Photonenenergie bei etwa 2,5 eV. Die Materialzusammensetzung wird dabei mit polarisiertem Licht durchstrahlt und das dabei an den Partikeln 3 gestreute Licht wird in einem Gitterspektrometer spektral aufgelöst und anschließend durch eine CCD-Kamera detektiert.



Wie man sieht, ergibt sich ein unterschiedliches Verhalten der Plasmonenresonanz auf das Anlegen eines elektrischen Feldes  $F$  in den beiden Domänen. Während in dem in der Fig.2a gezeigten Fall eine Verschiebung der Plasmonenresonanz zu niedrigeren Energien (Rotverschiebung) bei Anlegen des elektrischen Feldes erfolgt, zeigt sich in Fig.2b eine Verschiebung zu höheren Energien (Blauverschiebung). In beiden Fällen ergibt sich für beispielhaft angenommene eingestrahlte Photonenenergien von 2,25 und 2,8 eV (s. Pfeile) eine Zunahme der gestreuten Lichtintensität, womit die prinzipielle Eignung der Vorrichtung als elektrisch steuerbarer Lichtstreuer gezeigt ist. Entscheidend für das unterschiedliche Verhalten der Plasmonenresonanz ist ihre verschiedene spektrale Lage bei  $F = 0$  in den beiden Domänen. Für die Ausgangslage der Plasmonenresonanz ist die relative Lage des Polarisationsvektors der eingestrahlten Lichtwelle zu der Richtung der spontanen Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle 2.1 in den Domänen von Bedeutung.

Derselbe Sachverhalt kommt in Fig.3 zum Ausdruck. Hier ist das bei einer Domäne gemessene Maximum der Plasmonenresonanz in Abhängigkeit von dem Polarisationswinkel des eingestrahlten Lichts jeweils für  $F = 0$  und  $F > 0$  dargestellt. Bei bestimmten Polarisationswinkeln ergibt sich eine Blauverschiebung der Resonanz, während bei anderen Polarisationswinkeln eine Rotverschiebung der Plasmonenresonanz resultiert.

In Fig.4 ist als eine mögliche Anwendung ein Lichtwellenleiter 30 schematisch dargestellt, in den ein erfindungsgemäßer elektrisch steuerbarer Lichtstreuer integriert ist. Mit diesem kann gezielt und selektiv eine bestimmte Wellenlänge aus dem Spektralbereich der in dem Wellenleiter geführten und durch den Lichtstreuer hindurchtretenden elektromagnetischen Strahlung in ihrer Intensität abgeschwächt und zur Seite herausgestreut werden. Wenn also wie dargestellt, die Intensität dieser Wellenlänge  $I_0$  beträgt, so beträgt die transmittierte Intensität nach Passieren des elektrisch steuerbaren

Lichtstreuers bei dieser Wellenlänge  $I_T$ , während die aus dem Wellenleiter 30 herausgestreute Intensität bei dieser Wellenlänge mit  $I_S$  bezeichnet ist.

- 5 Wahlweise können die Elektroden des Lichtstreuers aus einem transparenten Material gefertigt sein, um die nutzbare Intensität des herausgestreuten Lichts zu steigern.

In der Fig.5 ist als eine weitere Anwendung ein vollfarbtauglicher Bildschirm 40 schematisch dargestellt. Dieser weist  
10 einen zweidimensionalen Wellenleiter 41, wie beispielsweise eine Glasplatte auf, in deren zwei gegenüberliegende Seitenkanten rotes, grünes und blaues Licht eingekoppelt wird, welches beispielsweise durch geeignet angeordnete LEDs oder Laserdioden emittiert werden kann. Auf eine Hauptoberfläche des  
15 Wellenleiters 41 ist eine regelmäßig Anordnung von Pixelelementen 43 aufgebracht, die jeweils aus einer Gruppe von Subpixeln 43.1, 43.2 und 43.3 für das Herausstreuen von rotem, grünem und blauem Licht ausgeführt sind. Die in diesen Subpixeln 43.1, 43.2 und 43.3 enthaltenen Materialzusammensetzungen  
20 und ihre jeweiligen Partikel sind so beschaffen, dass sie im roten, grünen und blauen Spektralbereich elektrisch gesteuerte Lichtstreuung erlauben. Die Subpixel können unabhängig voneinander mit Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  angesteuert werden.  
25

Ein Teil des in den Wellenleiter 41 eingekoppelten Lichts gelangt durch Vielfachreflexion an die mit den Pixelelementen 43 belegte Hauptoberfläche und damit in die Materialzusammensetzungsschichten der einzelnen Subpixel. Dort wird je nach  
30 der angelegten Spannung, die aus einem dem Bildschirm zugeführten Bildsignal entnommen wird, ein bestimmter Anteil des roten, grünen oder blauen Lichts herausgestreut. Wenn an keinem der Subpixel eines Pixelelements eine Spannung anliegt,  
35 so findet keinerlei Lichtstreuung statt, weil keine der eingekoppelten drei Wellenlängen mit den Plasmonenresonanzen der drei Materialzusammensetzungen der Subpixel zusammenfällt

oder überlappt. Das Pixelelement ist also dunkel. Wenn das Pixelelement rotes Licht emittieren soll, so wird dem roten Subpixel über das Bildsignal eine Spannung zugeführt, so dass sich seine Plasmonenresonanz zu der Wellenlänge des roten  
5 Lichts verschiebt. Es wird dann von den angebotenen drei Wellenlängen nur das rote Licht herausgestreut. Wenn beispielsweise zusätzlich das eine andere Materialzusammensetzung aufweisende grüne Subpixel elektrisch aktiviert wird, so verschiebt sich seine Plasmonenresonanz zu der Wellenlänge des  
10 grünen Lichts, so dass rotes und grünes Licht herausgestreut werden, wodurch sich durch additive Farbmischung ein gelber Farbeindruck dieses Pixelelements ergibt.

Alternativ zu der vorbeschriebenen Ansteuerung der Subpixel  
15 kann diese auch derart erfolgen, dass bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes die Plasmonenresonanz der entsprechenden Materialzusammensetzung nicht mit einer der bereitgestellten roten, grünen oder blauen Wellenlängen zusammenfällt und erst bei Abschalten des elektrischen die Verschiebung der Plasmonenresonanz ein derartiges Zusammenfallen bewirkt.  
20

Alternativ zu der gezeigten Ausführungsform kann auch vorgesehen sein, dass die Pixelelemente als eine Zwischenschicht in den Wellenleiter 41 integriert werden, damit ein größerer  
25 Anteil des von außen in den Wellenleiter 41 eingekoppelten Lichts in die Materialzusammensetzungen der einzelnen Subpixel gelangen kann.

Es kann auch vorgesehen sein, dass die drei verschiedenfarbigen Subpixel jedes Pixelelements nicht nebeneinander sondern in einer Art Sandwich-Anordnung in vertikaler Richtung übereinander angeordnet sind. Diese Anordnung sollte von unten nach oben in der Reihenfolge Rot, Grün, Blau erfolgen, um auszuschließen, dass das aus einem Bereich herausgestreute  
30 Licht durch die jeweils anderen Bereiche geschwächt wird.  
35

Der Bildschirm 40 kann auch als monochromer Bildschirm ausgeführt sein, indem die Pixelelemente einteilig aufgebaut sind, und Licht einer Wellenlänge oder eines relativ schmalen Wellenlängenbereichs in die Seitenkanten des Wellenleiters 41  
5 eingekoppelt wird.

In der Fig.6 ist eine alternative Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Bildschirms in einer partiellen Querschnittsansicht dargestellt, aus der ersichtlich wird, dass  
10 das Licht nicht notwendigerweise seitlich in den Wellenleiter eingekoppelt werden muß. Ein Bildschirm 50 kann auch einen Wellenleiter 51 aufweisen, durch dessen ebene Substrat-Rückseite das Licht eingekoppelt wird, und der kleine pyramiden- oder rillenförmige Vertiefungen 52 aufweist, an deren innerer  
15 Oberfläche das eingekoppelte Licht totalreflektiert wird. Die Darstellung zeigt einen Ausschnitt des Bildschirms 50 entlang einer durch zwei Vertiefungen 52 verlaufenden Ebene. Die Vertiefungen 52 sind mit Schichten von Materialzusammensetzungen beschichtet, in denen erfindungsgemäß Partikel 3 eingebettet  
20 sind. Bei der Totalreflexion entsteht ein evaneszentes Feld, welches in die Materialzusammensetzungsschichten hineinreicht und aus dem heraus Licht mit der gewünschten Farbe in alle Ausbreitungsrichtungen und somit auch nach vorne in die Richtung des Betrachters gestreut wird. Ein polychromer Bildschirm kann in an sich bekannter Weise so konzipiert werden,  
25 dass die Vertiefungen sich rillenförmig in einer von zwei orthogonalen Richtungen über die gesamte Oberfläche parallel zueinander erstrecken und in alternierender Weise mit „roten“, „grünen“ und „blauen“ Materialzusammensetzungen beschichtet sind, wobei dann ein Pixelelement durch drei neben-  
30 einanderliegende Subpixel gebildet wird. Die Vertiefungen 52 können jedoch auch punktförmig ausgedehnt sein, so dass die Pixelelemente als Farbtripel mit dreizählig angeordneten Subpixeln ausgeführt werden können. Die Elektroden zur Ansteuerung der Subpixel könnten beispielsweise auf den gegenüber-  
35 liegenden Wänden der Vertiefungen 52 aufgebracht sein.

Als eine weitere Anwendung ist in der Fig.7 eine im wesentlichen transparente Substratscheibe 60 wie eine (Fenster-)Glasscheibe oder eine Kunststoffscheibe schematisch dargestellt, die von hinten mit weißem Licht, beispielsweise Tageslicht durchstrahlt wird, und auf deren vorderer Hauptoberfläche ein erfindungsgemäßer elektrisch steuerbarer Lichtmodulator aufgebracht ist. Diese Anwendungsform entspricht also im wesentlichen der bereits in Fig.1a,b gezeigten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Aus der Fig.7 wird deutlich, dass man auf diese Weise elektrisch schaltbare Farbeffekte bei transparenten oder semitransparenten Glasscheiben herbeiführen kann. Es können mit der gezeigten Anordnung zwei verschiedene Farbzustände eingestellt werden, da je nach der spektralen Position der Plasmonenresonanz ein im wesentlichen der spektralen Breite der Plasmonenresonanz entsprechender Wellenlängenbereich aus dem eingekoppelten Weißlichtspektrum herausgestreut und absorbiert wird und damit ein um diesen Wellenlängenbereich reduziertes Weißlichtspektrum zu dem Beobachter gelangt. Wenn eine Spannung U angelegt wird, wird die Plasmonenresonanz und damit auch die spektrale Position des herausgestreuten und absorbierten Wellenlängenbereichs verschoben. Es kann auch vorgesehen sein, dass die Plasmonenresonanz im spannungslosen Zustand außerhalb des lichtoptischen Spektralbereichs liegt und somit die Substratscheibe vollständig transparent ist, und erst bei Anlegen einer Spannung die Plasmonenresonanz in den sichtbaren Spektralbereich geschoben wird.

In ähnlicher Weise kann die erfindungsgemäße Vorrichtung auf eine Laserschutzbrille angewendet werden, bei der ein elektrisch steuerbarer Lichtstreuer jeweils auf einer der Hauptoberflächen der Brillengläser angeordnet ist. Eine solche Laserschutzbrille hätte den Vorteil, dass anders als bei herkömmlichen Laserschutzbrillen das Laserlicht nicht bei einer unveränderlichen Wellenlänge sondern bei einer wählbaren Wellenlänge abgeschwächt würde und somit äußerst vielseitig einsetzbar wäre.

## Patentansprüche

1. Materialzusammensetzung, in welcher
  - in einem Medium (2), welches in einem Bereich elektromagne-  
5        tischer Strahlung transparent ist, ein oder eine Mehrzahl  
      von Partikeln (3) eingebettet ist, welche
  - derart beschaffen sind, dass ihre frequenzabhängige Antwort  
      auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung minde-  
      stens eine Resonanz, insbesondere eine Plasmonenresonanz,  
10        aufweist,

d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass

  - das Medium (2) eine durch elektrische und/oder optische  
      Felder induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Bre-  
      chungsindex aufweist.

15
2. Materialzusammensetzung nach Anspruch 1,  
d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass
  - das Medium (2) durch ein elektrisches Feld ausrichtbare Mo-  
      leküle, insbesondere Flüssigkristall-Moleküle (2.1), auf-  
20        weist.

20
3. Materialzusammensetzung nach Anspruch 1,  
d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass
  - das Medium (2) ein anorganisches elektrooptisches Material,  
25        insbesondere einen ferroelektrischen Kristall wie  $\text{LiNbO}_3$ ,  
       $\text{LiTaO}_3$  oder KDP aufweist.

25
4. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vor-  
hergehenden Ansprüche,  
30        d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass
  - die Partikel (3) ein Metall, einen dotierten Halbleiter  
      oder einen Supraleiter enthalten oder jeweils aus einer  
      Kombinationen dieser Materialien aufgebaut sind.

30
- 35        5. Materialzusammensetzung nach Anspruch 4,  
      d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel zur Gänze aus einem Metall, insbesondere aus Gold, Silber, Kupfer oder einem Alkalimetall zusammengesetzt sind.

5 6. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 1000 nm aufweisen.

10

7. Materialzusammensetzung nach Anspruch 6,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 500 nm aufweisen.

15

8. Materialzusammensetzung nach Anspruch 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 200 nm aufweisen.

20

9. Materialzusammensetzung nach Anspruch 8,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel (3) einen mittleren Durchmesser in einem Bereich zwischen 1 und 100 nm aufweisen.

25

10. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Partikel (3) eine sphärische, ellipsoidale oder

30

stäbchenförmige Form aufweisen.

11. Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- 35 - die Materialzusammensetzung als eine Schicht (10) auf ein Substrat (1) aufgebracht ist.

12. Verwendung einer Materialzusammensetzung nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zur Modulation von elektromagnetischer Strahlung, bei welchem
- die elektromagnetische Strahlung durch die Materialzusammensetzung geführt wird, und
  - in der Materialzusammensetzung ein statisches elektrisches Feld und/oder ein elektrisches oder elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt wird.
13. Vorrichtung, insbesondere elektrisch steuerbarer Lichtmodulator, in welcher eine Materialzusammensetzung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11 enthalten und eine diese Materialzusammensetzung durchsetzendes statisches elektrisches Feld und/oder ein elektrisches oder elektromagnetisches Wechselfeld erzeugbar ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13,  
g e k e n n z e i c h n e t   d u r c h
- zwei voneinander beabstandete und an eine Spannungsquelle anschließbare Elektroden (20), deren Zwischenraum mindestens teilweise durch die Materialzusammensetzung ausgefüllt ist.
15. Vorrichtung nach Anspruch 14 in Verbindung mit einer Materialzusammensetzung nach Anspruch 11,  
d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t, dass
- die Elektroden (20) auf die Schicht (10) der Materialzusammensetzung aufgebracht sind.
16. Lichtwellenleiter (30), in welchen
- eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15 derart integriert ist, dass
  - eine in dem Lichtwellenleiter (30) geführte elektromagnetische Welle durch die Materialzusammensetzung hindurchtritt.



17. Bildschirm (40, 50) mit

- einer Mehrzahl von regelmäßig angeordneten Pixelelementen (43), die jeweils durch eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14 gebildet sind.

5

18. Bildschirm (40, 50) nach Anspruch 17,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- die Pixelelemente (43) auf oder in einem gemeinsamen Substrat (41, 51) angeordnet sind, in welches Licht mit einer Wellenlänge oder in einem Wellenlängenbereich einkoppelbar ist, welches durch die
- Pixelelemente (43) aus der Substratebene herausgestreut werden kann.

15 19. Bildschirm nach Anspruch 17 oder 18,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- er als monochromer Bildschirm ausgeführt ist, wobei
- Licht im wesentlichen einer Wellenlänge oder eines relativ schmalen Wellenlängenbereichs bezüglich des sichtbaren Spektralbereichs einkoppelbar ist.

20

20. Bildschirm (40, 50) nach Anspruch 17 oder 18,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass

- er als polychromer Bildschirm (40, 50) ausgeführt ist, bei welchem
- die Pixelelemente (43) jeweils aus drei Subpixeln (43.1, 43.2, 43.3) für die Farben Rot, Grün und Blau aufgebaut sind,
- Licht einkoppelbar ist, welches zumindest rote, grüne und blaue Spektralanteile enthält.

25

30

21. Substratscheibe (60), insbesondere Glas- oder Kunststoffscheibe, auf deren

- einer Hauptoberfläche eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15 aufgebracht ist.

35

22. Laserschutzbrille, bei welcher
- auf jeweils einer Hauptoberfläche der Brillengläser eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15 aufgebracht ist.

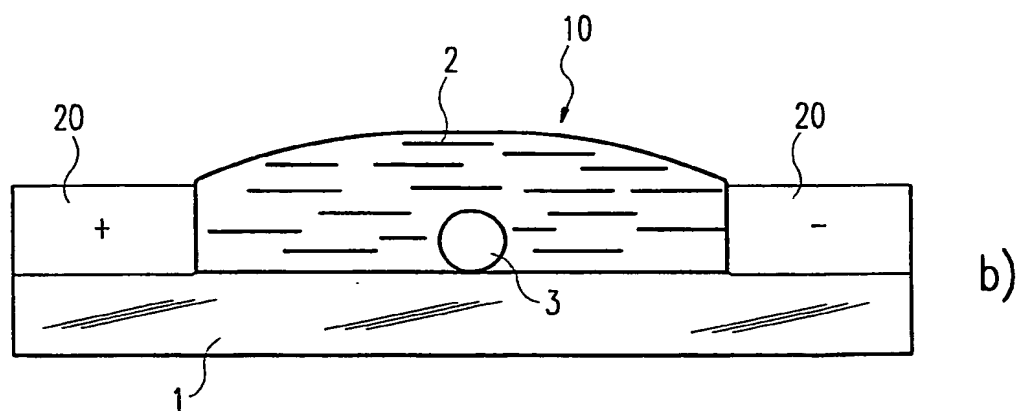
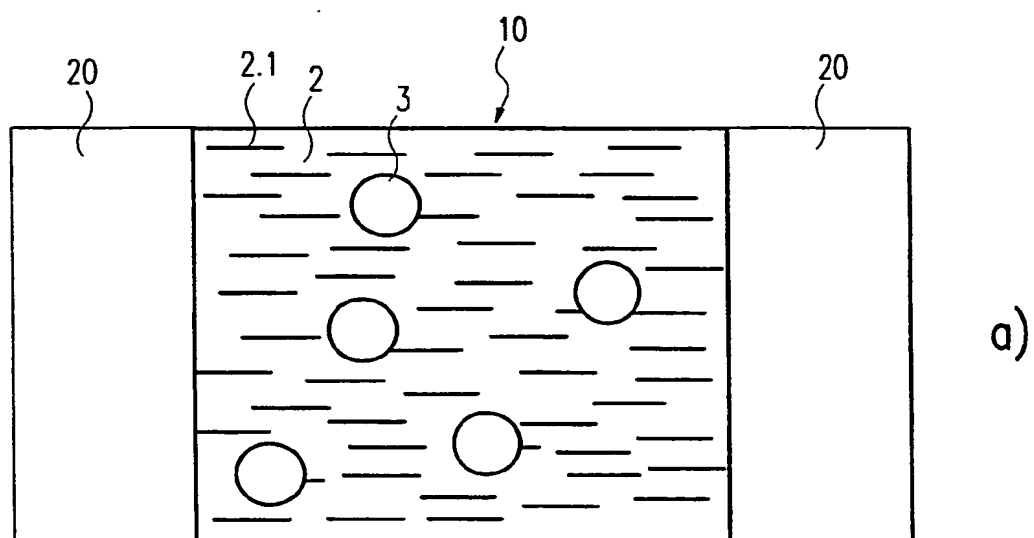
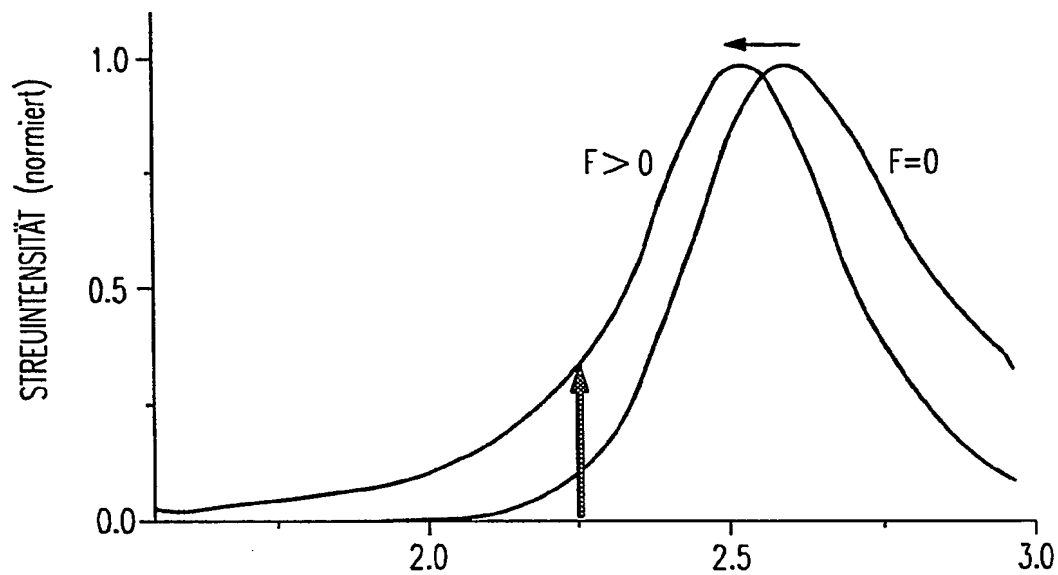
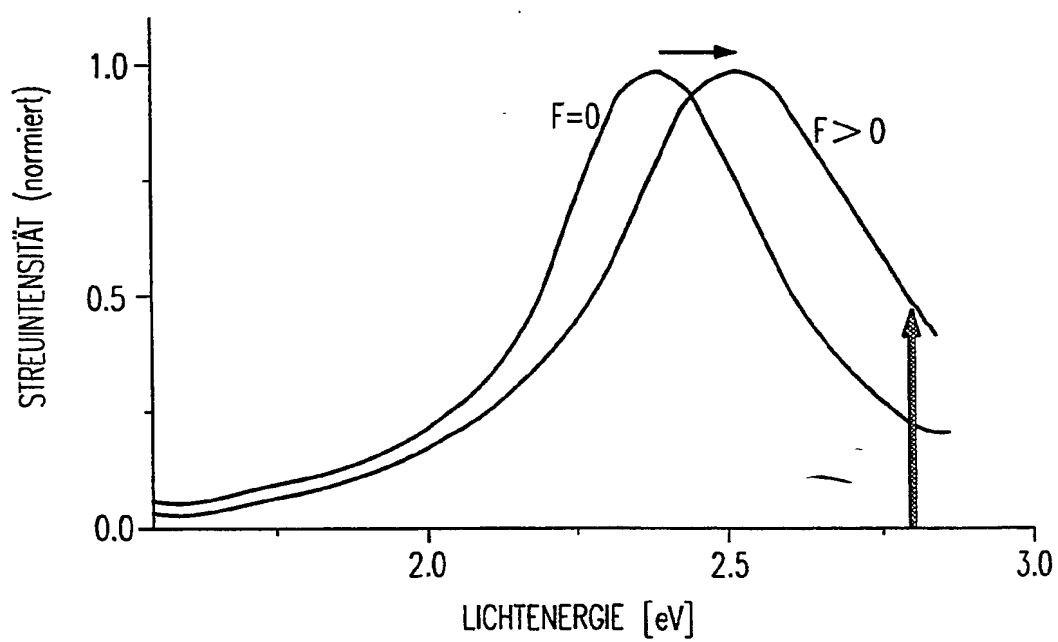


Fig. 1

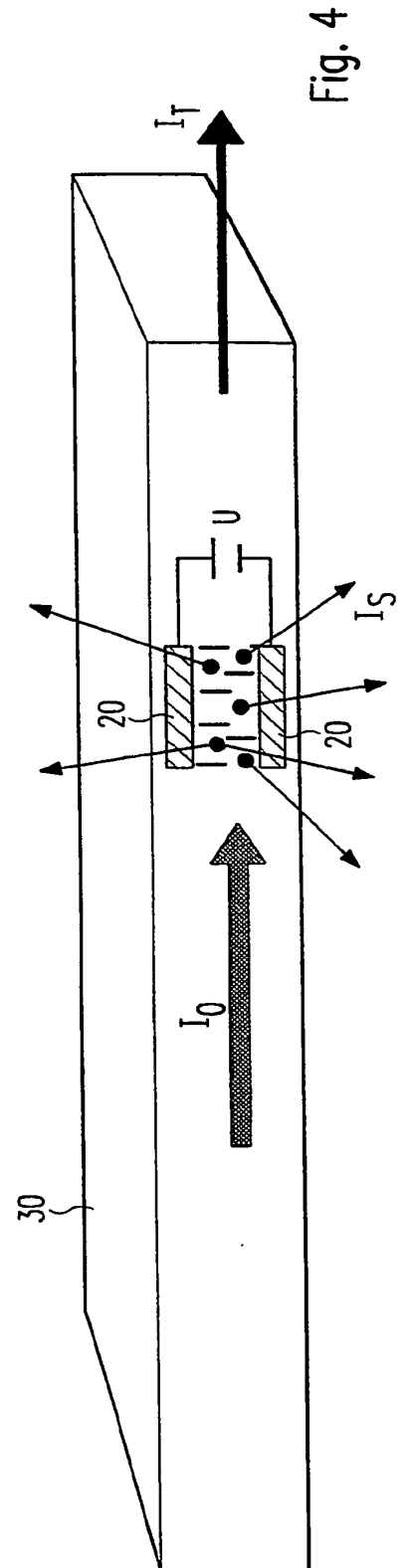
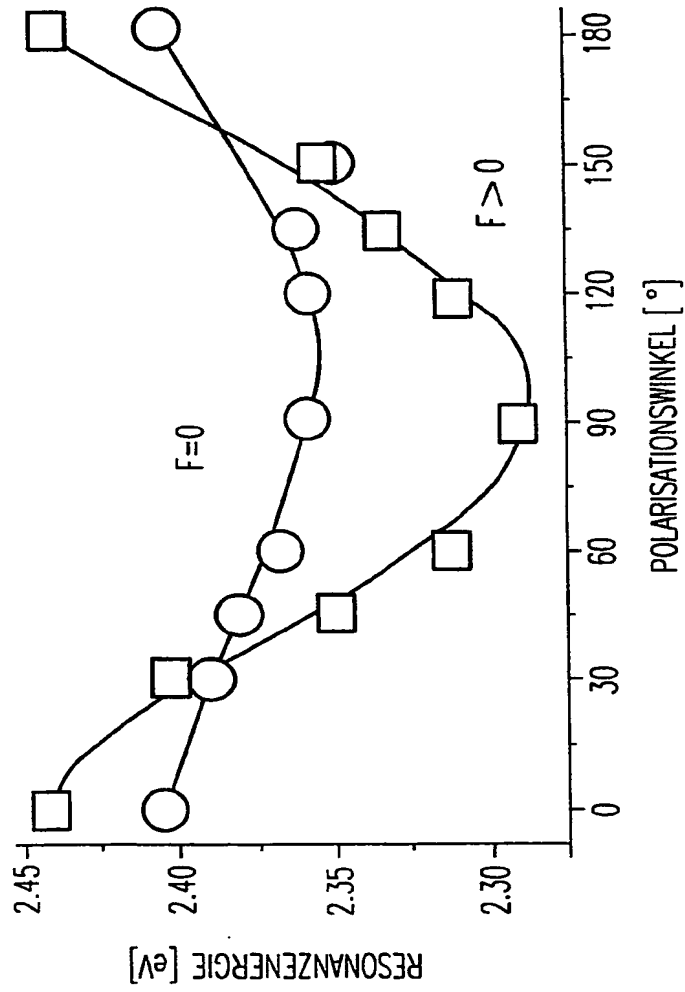


a)



b)

Fig. 2



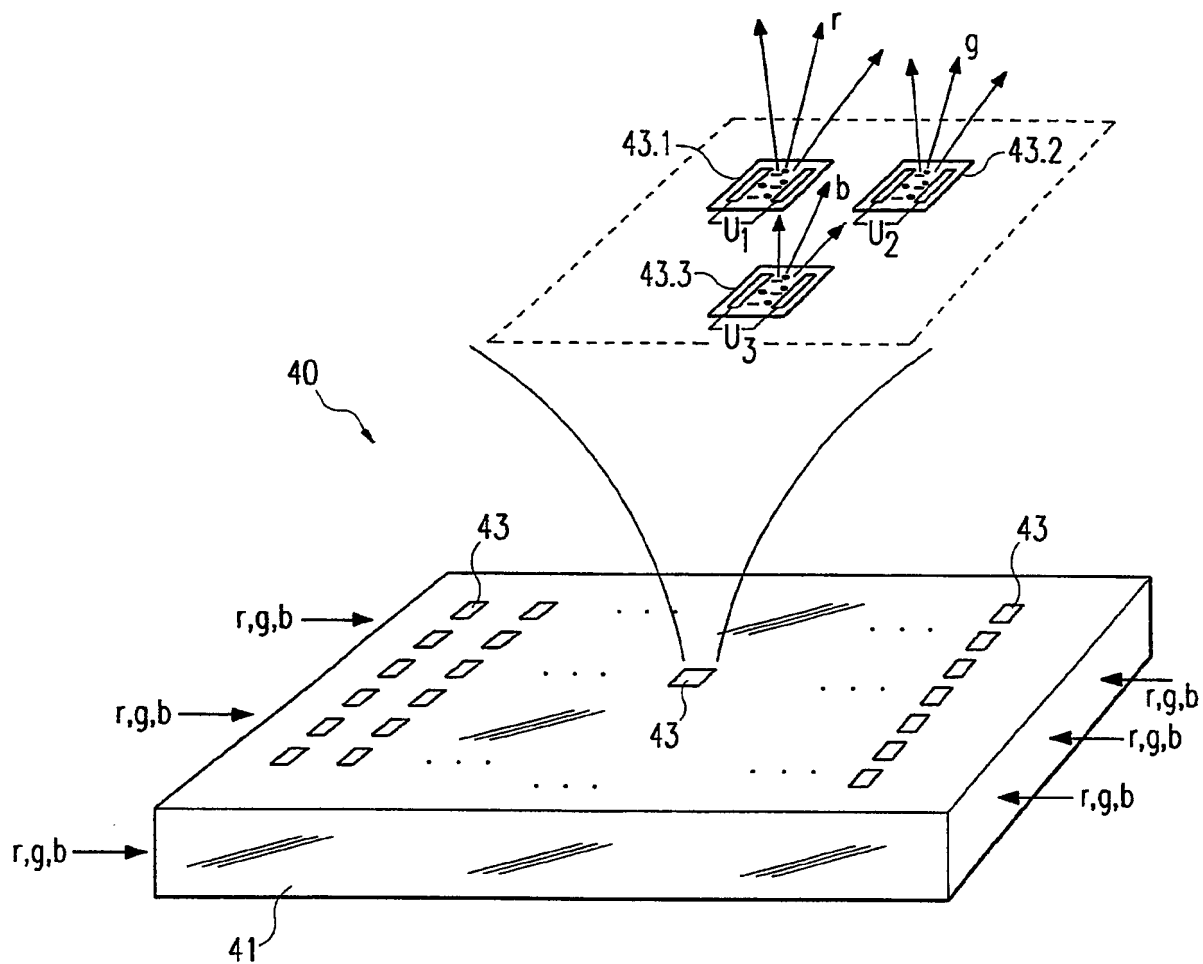
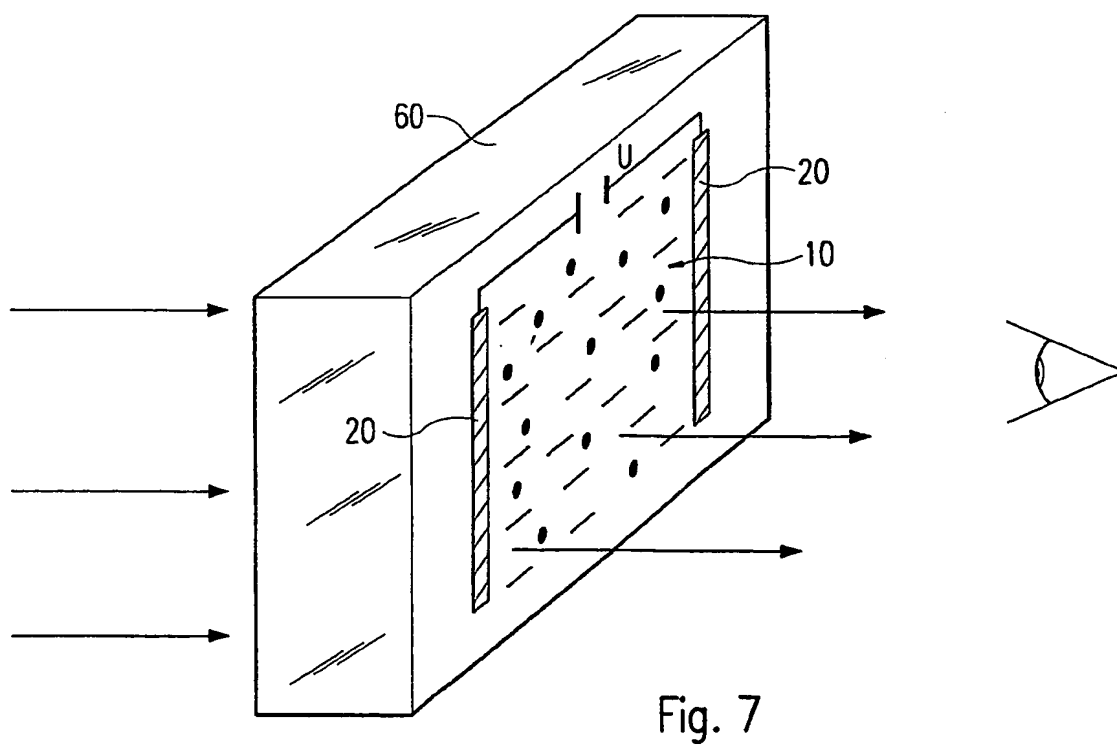
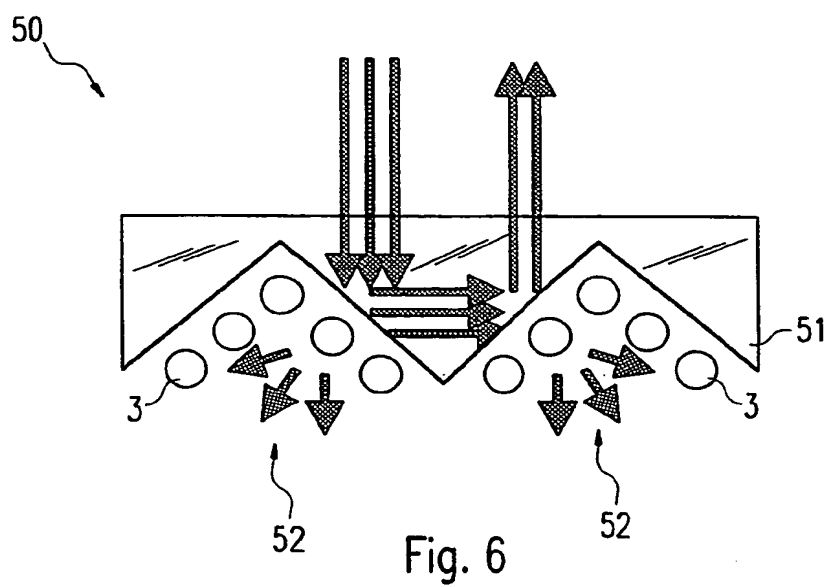


Fig. 5







(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
30. Januar 2003 (30.01.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 03/009058 A3**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G02F 1/137**,  
1/03, C09K 19/52, A61F 9/02

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE02/02593

(22) Internationales Anmeldedatum:  
15. Juli 2002 (15.07.2002)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
101 35 114.3 19. Juli 2001 (19.07.2001) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): **LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN** [DE/DE]; Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539  
München (DE).

(72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **FELDMANN, Jochen**  
[DE/DE]; Gartenstr. 29b, 85238 Petershausen (DE).  
**SÖNNICHSEN, Carsten** [DE/DE]; Zieblandstr. 6, 80798  
München (DE). **VON PLESSEN, Gero** [DE/DE]; Schüm-  
merstr. 9, 52134 Herzogenrath (DE). **PERNER, Martin**  
[DE/DE]; Josef-Sterr-Strasse 13, 81377 München (DE).

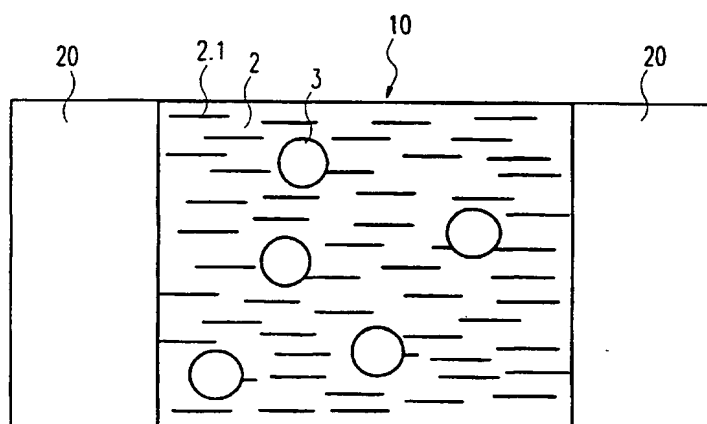
[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ELECTRICALLY CONTROLLABLE LIGHT MODULATOR

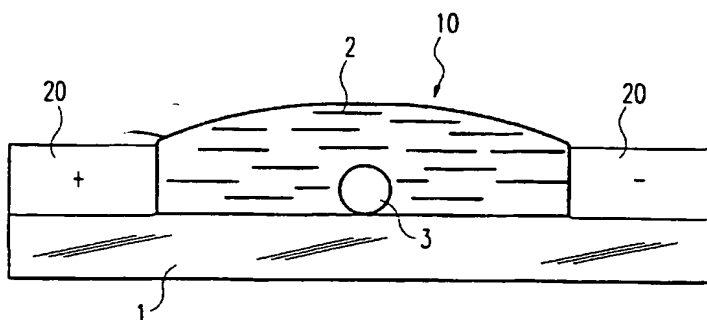
(54) Bezeichnung: ELEKTRISCH STEUERBARER LICHTMODULATOR



WO 03/009058 A3



a



b

(57) Abstract: A layer (10) of a material composition comprises a medium (2), which is transparent to electromagnetic radiation in an area and inside of which a single or a number of particles (3) is/are embedded that are created so that their frequency-dependent response to the irradiation of electromagnetic radiation has at least one resonance, particularly a plasmon resonance, whereby the medium (2) has an anisotropy of the refractive index that can be induced or altered by an electric field. The electric field generated by two electrodes (20) permits the plasmon resonance to be shifted and thus the production of an electrically controllable light modulation, particularly light scatter or light reflection and light absorption.

(57) Zusammenfassung: Eine Schicht (10) einer Materialzusammensetzung weist ein Medium (2) auf, welches in einem Bereich elektromagnetischer Strahlung transparent ist, und in welchem ein einzelnes oder eine Mehrzahl Partikel (3) eingebettet ist, welche derart beschaffen sind, dass ihre frequenzabhängige Antwort auf die Einstrahlung elektromagnetischer Strahlung mindestens eine Resonanz, insbesondere eine Plasmonenresonanz,

aufweist, wobei das Medium (2) eine durch

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



**JAKAB, Arpad** [HU/DE]; Willi-Graf-Strasse 17/827,  
80805 München (DE).

(74) **Anwalt:** **LAMBSDORFF, Matthias;** Dingolfinger  
Strasse 6, 81673 München (DE).

eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,  
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT,  
SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,  
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(81) **Bestimmungsstaaten (national):** AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,  
CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE,  
GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR,  
KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK,  
MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU,  
SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,  
US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH,  
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht

(88) **Veröffentlichungsdatum des internationalen  
Recherchenberichts:**

1. Mai 2003

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen  
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on  
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe  
der PCT-Gazette verwiesen.*

ein elektrisches Feld induzierbare oder veränderbare Anisotropie des Brechungsindex aufweist. Durch das von zwei Elektroden (20) erzeugte elektrische Feld lässt sich die Plasmonenresonanz verschieben und damit eine elektrisch steuerbare Lichtmodulation, insbesondere Lichtstreuung bzw. -reflexion und Lichtabsorption herbeiführen.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/DE 02/02593

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G02F1/137 G02F1/03 C09K19/52 A61F9/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G02F C09K A61F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No.     |
|------------|--|---------------------------|
| X          | LEE S ET AL: "Dynamic behavior of silica particles in liquid crystals under an AC applied voltage"<br>PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC LIQUIDS, 1999. (ICDL '99). NARA, JAPAN, 20 - 25 July 1999, pages 571-574, XP010354581<br>PISCATAWAY, NJ, USA, US<br>ISBN: 0-7803-4759-5<br>the whole document | 1,2,<br>6-15,17,<br>21    |
| X          | EP 0 334 176 A (HOECHST CELANESE CORP)<br>27 September 1989 (1989-09-27)<br><br>page 7, line 9 - line 48<br>examples I,V<br><br>-/-  | 1,2,<br>4-11,<br>13-15,21 |

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 January 2003

Date of mailing of the international search report

14/02/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Frank, W

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/DE 02/02593

| C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT |  |                       |
|--|--|-----------------------|
| Category *   | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No. |
| X  | US 5 472 777 A (MORI MASAMI ET AL)<br>5 December 1995 (1995-12-05)<br>column 1, line 11 - line 16<br>column 2, line 10 - line 14<br>column 2, line 25 - line 42<br>column 6, line 18 - column 7, line 43<br>---  | 1,3-9,<br>11,13,21    |
| A  | US 3 980 396 A (POLLACK JOEL M ET AL)<br>14 September 1976 (1976-09-14)<br>column 8, line 32 - column 9, line 4;<br>figure 4<br>---  | 18-20                 |
| A  | US 5 173 811 A (GUMBS RONALD W)<br>22 December 1992 (1992-12-22)<br>Abschnitt "General Description"<br>---   | 22                    |
| P,X  | MUELLER J ET AL: "ELECTRICALLY CONTROLLED<br>LIGHT SCATTERING WITH SINGLE METAL<br>NANOPARTICLES"<br>APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN<br>INSTITUTE OF PHYSICS, NEW YORK, US,<br>vol. 81, no. 1, 1 July 2002 (2002-07-01),<br>pages 171-173, XP001129743<br>ISSN: 0003-6951<br>--- | 1,2,<br>4-17,21       |
| P,A  | the whole document<br>-----  | 3,18-20,<br>22        |

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Info on patent family members

International Application No

PCT/DE 02/02593

| Patent document<br>cited in search report |   | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date |
|---|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| EP 0334176                                | A | 27-09-1989          | US 4828758 A               | 09-05-1989          |
|   |   |                     | EP 0334176 A1              | 27-09-1989          |
|   |   |                     | JP 2008822 A               | 12-01-1990          |
|   |   |                     | US 4913845 A               | 03-04-1990          |
| US 5472777                                | A | 05-12-1995          | JP 3214741 B2              | 02-10-2001          |
|   |   |                     | JP 6035016 A               | 10-02-1994          |
|   |   |                     | JP 3016666 B2              | 06-03-2000          |
|   |   |                     | JP 6148703 A               | 27-05-1994          |
|   |   |                     | JP 3243307 B2              | 07-01-2002          |
|   |   |                     | JP 6148704 A               | 27-05-1994          |
|   |   |                     | JP 6222411 A               | 12-08-1994          |
|   |   |                     | US 5401569 A               | 28-03-1995          |
| US 3980396                                | A | 14-09-1976          | CA 1039840 A1              | 03-10-1978          |
| US 5173811                                | A | 22-12-1992          | NONE                       |                     |

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internatioj Aktenzeichen

PCT/DE 02/02593

## A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 G02F1/137 G02F1/03 C09K19/52 A61F9/02

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G02F C09K A61F

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile  | Betr. Anspruch Nr.        |
|------------|---|---------------------------|
| X          | LEE S ET AL: "Dynamic behavior of silica particles in liquid crystals under an AC applied voltage"<br>PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC LIQUIDS, 1999. (ICDL '99). NARA, JAPAN, 20. - 25. Juli 1999, Seiten 571-574, XP010354581<br>PISCATAWAY, NJ, USA, US<br>ISBN: 0-7803-4759-5<br>das ganze Dokument | 1,2,<br>6-15,17,<br>21    |
| X          | EP 0 334 176 A (HOECHST CELANESE CORP)<br>27. September 1989 (1989-09-27)<br><br>Seite 7, Zeile 9 - Zeile 48<br>Beispiele I,V<br><br>---<br>-/--  | 1,2,<br>4-11,<br>13-15,21 |



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- \*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- \*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- \*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- \*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- \*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

24. Januar 2003

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

14/02/2003

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Frank, W

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationaler Aktenzeichen

PCT/DE 02/02593

| Im Recherchenbericht<br>angeführtes Patentdokument | Datum der<br>Veröffentlichung | Mitglied(er) der<br>Patentfamilie | Datum der<br>Veröffentlichung |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| EP 0334176   | A                             | 27-09-1989                        | US 4828758 A 09-05-1989       |
|  |                               | EP 0334176 A1                     | 27-09-1989                    |
|  |                               | JP 2008822 A                      | 12-01-1990                    |
|  |                               | US 4913845 A                      | 03-04-1990                    |
| US 5472777   | A                             | 05-12-1995                        | JP 3214741 B2 02-10-2001      |
|  |                               | JP 6035016 A                      | 10-02-1994                    |
|  |                               | JP 3016666 B2                     | 06-03-2000                    |
|  |                               | JP 6148703 A                      | 27-05-1994                    |
|  |                               | JP 3243307 B2                     | 07-01-2002                    |
|  |                               | JP 6148704 A                      | 27-05-1994                    |
|  |                               | JP 6222411 A                      | 12-08-1994                    |
|  |                               | US 5401569 A                      | 28-03-1995                    |
| US 3980396   | A                             | 14-09-1976                        | CA 1039840 A1 03-10-1978      |
| US 5173811   | A                             | 22-12-1992                        | KEINE                         |

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile  | Betr. Anspruch Nr.    |
|------------|---|-----------------------|
| X          | US 5 472 777 A (MORI MASAMI ET AL)<br>5. Dezember 1995 (1995-12-05)<br>Spalte 1, Zeile 11 - Zeile 16<br>Spalte 2, Zeile 10 - Zeile 14<br>Spalte 2, Zeile 25 - Zeile 42<br>Spalte 6, Zeile 18 - Spalte 7, Zeile 43<br>----   | 1, 3-9,<br>11, 13, 21 |
| A          | US 3 980 396 A (POLLACK JOEL M ET AL)<br>14. September 1976 (1976-09-14)<br>Spalte 8, Zeile 32 - Spalte 9, Zeile 4;<br>Abbildung 4<br>----  | 18-20                 |
| A          | US 5 173 811 A (GUMBS RONALD W)<br>22. Dezember 1992 (1992-12-22)<br>Abschnitt "General Description"<br>----  | 22                    |
| P, X       | MUELLER J ET AL: "ELECTRICALLY CONTROLLED<br>LIGHT SCATTERING WITH SINGLE METAL<br>NANOPARTICLES"<br>APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN<br>INSTITUTE OF PHYSICS, NEW YORK, US,<br>Bd. 81, Nr. 1, 1. Juli 2002 (2002-07-01),<br>Seiten 171-173, XP001129743<br>ISSN: 0003-6951<br>----- | 1, 2,<br>4-17, 21     |
| P, A       | das ganze Dokument<br>-----   | 3, 18-20,<br>22       |